

TUYỂN TẬP BÁO CÁO

HỘI NGHỊ KHOA HỌC CÔNG NGHỆ TUYỂN KHOÁNG TOÀN QUỐC LẦN THỨ VI

CHẾ BIẾN VÀ SỬ DỤNG KHOÁNG SẢN Ở VIỆT NAM
GẮN VỚI PHÁT TRIỂN KHOA HỌC CÔNG NGHỆ
VÀ ĐỔI MỚI SÁNG TẠO



NHÀ XUẤT BẢN THANH NIÊN

TT	Họ và tên người viết	Tên báo cáo	Trang
33	Nguyễn Quang Minh Vũ Thị Thu Hà Nguyễn Minh Đăng	Một số kết quả chế biến khoáng vermiculit Việt Nam thành sản phẩm có khả năng ứng dụng xử lý ô nhiễm kim loại nặng trong nước	319
34	Trần Ngọc Anh Trần Thị Hiền	Nghiên cứu chế biến khoáng diatomit Phú Yên thành chất cải tạo đất sử dụng trong nông nghiệp	327
35	Trần Ngọc Anh Trần Thị Hiền Nguyễn Thu Hà và nnk	Đánh giá hiệu quả của chất cải tạo đất diatomit Phú Yên đến việc sử dụng nước tưới cho cây cà chua	339
36	Nguyễn Minh Đăng Vũ Thị Thu Hà	Một số kết quả chế biến khoáng diatomit Phú Yên thành sản phẩm bột trợ lọc bia chất lượng cao	347
37	Mai Văn Thịnh Vũ Tuấn Linh	Nghiên cứu giải pháp kỹ thuật công nghệ nâng cao hiệu quả xử lý bùn nước các nhà máy sàng tuyển than	354
38	Nguyễn Hoàng Sơn Phạm Thị Nhung Trần Văn Được	Nghiên cứu tuyển các cấp hạt mẫu than cám mỏ Vàng Danh trên thiết bị tuyển nổi trọng lực dạng Hydrofloat năng suất đến 1t/giờ	363
39	Vũ Tuấn Linh	Than pha trộn nhập khẩu giải pháp đột phá đảm bảo than cho nhu cầu than trong nước giai đoạn 2021 - 2030	371
V	TÁI CHẾ, TẬN THU VÀ BẢO VỆ MÔI TRƯỜNG		
40	Phạm Văn Luận Lê Việt Hà	Những xu hướng mới trong tái chế và tái sử dụng chất thải ngành công nghiệp khai khoáng	379
41	Nguyễn Thuý Lan Mai Trọng Ba	Quy định pháp luật về quản lý, tận thu, tái sử dụng chất thải và đề xuất cơ chế, chính sách hỗ trợ doanh nghiệp ngành công nghiệp khai khoáng	400
42	Nhữ Thị Kim Dung và nnk	Nghiên cứu công nghệ thu hồi quặng tinh sắt từ bãi thải quặng đuôi xưởng tuyển sắt Kíp Tróc	409
43	Trần Đức Thịnh Nguyễn Bá Nghiệm	Nghiên cứu công nghệ tuyển trọng lực thu hồi quặng tinh thiếc tại bãi thải Thập Lục Phần mò thiếc Tĩnh Túc - Cao Bằng	418
44	Hoàng Anh Tuấn Lê Chí Thành Nguyễn Thị Tâm và nnk	Nghiên cứu công nghệ tuyển nổi quặng apatit lấy tại hồ tuần hoàn nhà máy tuyển Bắc Nhạc Sơn bằng thuốc tập hợp thế hệ mới	430

NHỮNG XU HƯỚNG MỚI TRONG TÁI CHẾ VÀ TÁI SỬ DỤNG CHẤT THẢI NGÀNH CÔNG NGHIỆP KHAI KHOÁNG

Phạm Văn Luận, Lê Việt Hà

Trường Đại học Mỏ - Địa chất

Trong quá trình khai thác, tuyển và chế biến khoáng sản luôn tạo ra một lượng chất thải khổng lồ. Ở Việt Nam nói riêng và thế giới nói chung, chất thải ngành công nghiệp khai khoáng là một trong những thách thức lớn nhất đối với môi trường. Nếu không được quản lý đúng cách, những loại chất thải này có thể gây ra những thiệt hại không thể phục hồi cho môi trường và tạo thành mối nguy hiểm cho con người. Tuy nhiên, những thách thức về môi trường hoàn toàn có thể được giải quyết. Khi ngành công nghiệp khai thác, tuyển và chế biến khoáng sản Hình thành các mô Hình kinh tế tuần hoàn, nhằm phát triển quá trình sản xuất “không chất thải” thông qua tái chế và tái sử dụng các loại chất thải của ngành. Nói cách khác, chất thải của ngành công nghiệp khai khoáng, phải được coi là nguồn tài nguyên thứ cấp có giá trị kinh tế. Báo cáo này, trình bày tổng quan về các nghiên cứu và những xu hướng mới trong tái chế và tái sử dụng chất thải của ngành công nghiệp khai khoáng trên thế giới. Từ đó đưa ra các định hướng, nhằm phát triển bền vững ngành công nghiệp khai thác và chế biến khoáng sản của Việt Nam.

1. Giới thiệu

Quá trình khai thác và chế biến khoáng sản tạo ra một lượng đáng kể chất thải, thường bao gồm: chất thải rắn ở dạng đá thải, bụi, bùn và xỉ; chất thải lỏng ở dạng nước thải và chất thải ở dạng khí. Chất thải ngành công nghiệp khai khoáng là một trong những thách thức lớn nhất đối với môi trường nếu không được quản lý đúng cách, các chất thải này có thể gây nên những thiệt hại không thể phục hồi đối với môi trường và sức khỏe con người. Đặc biệt, ở Việt Nam, những loại chất thải này thường được xử lý tại các bãi chôn lấp, tạo ra những rủi ro nghiêm trọng cho môi trường và sức khỏe cho cộng đồng. Để giảm thiểu tác động của ngành công nghiệp khai khoáng đến môi trường, đòi hỏi Nhà nước phải có các giải pháp quản lý tổng hợp chất thải kết hợp với giảm lượng chất thải phát sinh. Tái chế và tái sử dụng chất thải theo xu hướng nền kinh tế tuần hoàn là phương pháp hiệu quả nhất đang được thế giới áp dụng (Ndlovu, Simate và Matinde, 2017). Do đó, việc tăng cường tái chế và tái sử dụng các loại chất thải từ ngành công nghiệp khai khoáng sẽ liệu thuốc chữa bách bệnh cho môi trường và sức khỏe cộng đồng. Ngành công nghiệp khai khoáng có thể Hình thành các mô Hình kinh tế tuần hoàn không chất thải, thông qua việc tái chế và tái sử dụng chất thải (Ndlovu, Simate và Matinde, 2017). Trên thực tế, chất thải ngành công nghiệp khai khoáng cần được coi là nguồn tài nguyên thứ cấp.

Mô Hình kinh tế tuần hoàn thể hiện trách nhiệm với môi trường và phát triển bền vững. Báo cáo này trình bày các giải pháp thay thế bền vững về nguồn cung cấp khoáng sản từ hoạt động khai thác khoáng sản thông qua việc tái chế và tái sử dụng chất thải ngành công nghiệp khai khoáng. Đồng thời đề xuất những nghiên cứu tiềm năng để góp phần nâng cao giá trị kinh tế cho chất thải ngành công nghiệp khai khoáng.

2. Các loại chất thải ngành công nghiệp khai khoáng

Chất thải được tạo ra theo nhiều cách khác nhau, thành phần và khối lượng của nó phụ thuộc phần lớn vào các công nghệ sản xuất, cơ cấu kinh tế và tiêu thụ. Trên thực tế, chất thải phát sinh từ hoạt động khai thác, tuyển khoáng và luyện kim thường được coi là không đáng kể và không có giá trị kinh tế. Do đó, chúng thường được thải bỏ hoặc chôn lấp. Bất chấp những nỗ lực giảm phát sinh chất thải cho ngành công nghiệp khai khoáng, nhưng loại chất thải này vẫn là một trong những loại chất thải lớn nhất thế giới. Bảng 1 trình bày một số loại chất thải trong ngành khai thác và chế biến khoáng sản (Ndlovu, Simate và Matinde, 2017).

Bảng 1. Các loại chất thải trong ngành công nghiệp khai khoáng

Loại chất thải	Đặc điểm
Đất đá phủ	Đất đá được loại bỏ để tiếp cận các vỉa khoáng sản và thường được tích trữ. Đất đá phủ có khả năng gây ô nhiễm môi trường thấp, nhưng có thể liên quan đến hệ thống thoát nước axit.
Đá thải	Chứa các chất có ích ở hàm lượng rất thấp để thu hồi một cách kinh tế. Đá thải có thành phần khoáng vật, đặc tính hóa học và vật lý không đồng nhất do sự lắng đọng của các phế thải từ các nguồn mỏ khác nhau. Tùy thuộc vào khoáng sản được khai thác, đá thải có thể Hình thành sự thoát nước axit.
Đuôi thải nhà máy tuyển	Đuôi thải của nhà máy tuyển có thể còn chứa các chất hóa học còn sót lại và thường được lắng đọng ở các hồ chứa phế thải quặng đuôi.
Xi của nhà máy hòa luyện	Vật liệu giống thủy tinh hoặc vô định Hình được sản xuất dưới dạng phụ phẩm trong quá trình nấu chảy và tinh luyện kim loại. Mặc dù một số xi như xi lò cao có thể thân thiện với môi trường và được ứng dụng rộng rãi trong các ngành xây dựng và nông nghiệp, nhưng sự hiện diện của các kim loại nặng bị cuốn hoặc hòa tan trong xi gây ra những thách thức cho việc tái sử dụng.
Nước thải	Tạo ra từ một số quy trình sản xuất, với các mức độ khác nhau về chất lượng và khả năng gây ô nhiễm môi trường. Điển Hình như: nước mỏ; nước sử dụng trong nhà máy; nước của quá trình hòa tách (chứa khoáng chất hòa tan, hóa chất và kim loại); nước thải (nước đã được xử lý trước khi thải ra môi trường) và nước thoát từ mỏ (nước mặt hoặc nước ngầm có khả năng chảy ra khỏi mỏ).
Bùn thải	Cặn lắng hoặc bùn còn lại sau quá trình xử lý tại chỗ đối với nước thải và nước thải mỏ. Bùn thải có thể bị ô nhiễm bởi kim loại nặng và các hóa chất còn sót lại. Việc tái chế và thu hồi các kim loại có giá trị từ bùn thải đang được nhiều nghiên cứu quan tâm. Tùy thuộc vào quy trình, bùn thải có thể được xếp vào loại vật liệu nguy hại.
Nước axit thoát ra từ mỏ	Được tạo ra từ đá thải mỏ, quặng đuôi và các cấu trúc của mỏ như các hồ kín, đang hoạt động hoặc bị bỏ hoang và các công trình dưới lòng đất.
Khí thải dạng	Khí thải dưới dạng bụi hạt và khí độc như SO_x , NO_x , CO, CO_2 , các hợp chất hữu cơ kim loại, polychlorinated-p-dibenzodioxins và dibenzofurans

khí và dạng hạt	(PCCD/Fs) phát ra môi trường trong quá trình xử lý kim loại ở nhiệt độ cao. Những khí thải này được xếp vào loại vật liệu nguy hiểm do sự hiện diện của các kim loại nặng độc hại, các hợp chất cơ kim loại độc hại và PCCD/Fs.
Chất thải sau tiêu dùng	Vật liệu thải được tạo ra bởi các hộ gia đình hoặc các cơ sở thương mại, công nghiệp là vòng đời cuối cùng của sản phẩm và sản phẩm không còn được sử dụng cho các mục đích ban đầu, ví dụ: chất thải điện tử.

3. Những nghiên cứu và xu hướng tái chế và tái sử dụng chất thải ngành công nghiệp khai khoáng

Mô Hình kinh tế tuần hoàn yêu cầu giảm thiểu, tái chế và tái sử dụng chất thải ngành công nghiệp khai khoáng. Dựa trên các loại chất thải được nêu trong Bảng 1, trong phần này giới thiệu các phương pháp điển Hình để tái chế và tái sử dụng các loại chất thải ngành công nghiệp khai khoáng, cũng như những xu hướng mới về chuyển đổi chất thải thành nguồn tài nguyên có giá trị.

3.1. Đất đá phủ, đá thải và đuôi thải nhà máy tuyển

Theo Bảng 1, đá thải và đất đá phủ có nguồn gốc từ các vật liệu nằm bên trên khu vực khai thác và được bóc tách để tiếp cận thân quặng. Những chất thải này thường không chứa chất có ích hoặc chứa chất có ích với hàm lượng thấp và được coi là không có giá trị kinh tế. Còn đuôi thải nhà máy tuyển là phần chất thải còn lại sau quá trình tuyển. Về cơ bản, chất thải nhà máy tuyển bao gồm đá, đất dạng hạt gồm các hạt mịn đến siêu mịn. Đá thải, đất đá phủ và đuôi thải của các nhà máy tuyển có thành phần khoáng vật không đồng nhất, do sự lắng đọng của các phế thải phát sinh từ các khâu công nghệ khác nhau trong dây chuyền khai thác và chế biến khoáng sản. Hơn nữa, số lượng và độ phức tạp của chúng thay đổi đáng kể tùy thuộc vào loại thành phần có ích, thành phần hóa lý của quá trình khoáng hóa và phương pháp khai thác, chế biến được sử dụng (Ndlovu, Simate và Matinde, 2017).

Hàng năm, hàng triệu tấn đá thải, đất đá phủ và đuôi thải nhà máy tuyển được sinh ra bởi ngành công nghiệp khai khoáng. Do giá trị thấp và vị trí xa so với các hoạt động chế biến, nên hơn 95% vật liệu này được thải bỏ trong các bãi chôn lấp (Ndlovu, Simate, và Matinde, 2017). Tuy nhiên, việc thải bỏ có liên quan đến những thách thức về môi trường như thoát nước axit, phát thải bụi trong không khí, ô nhiễm nguồn nước mặt và nước ngầm. Do đó, phát triển công nghệ tái chế và tái sử dụng chúng là giải pháp bền vững và giảm chi phí để xử lý ô nhiễm môi trường và quản lý chất thải.

Đến nay, đã có nhiều nghiên cứu được tiến hành nhằm giảm thiểu các tác động môi trường và tăng hiệu quả kinh tế của các loại chất thải này. Ngoài việc sử dụng rộng rãi làm nguyên liệu thô cho xi măng, bê tông và cốt liệu trong ngành xây dựng. Đá thải và đất đá phủ cũng có thể được tái sử dụng làm tài nguyên thứ cấp, vật liệu lấp đầy, vật liệu che phủ cho các kho chứa chất thải và đất nền để phục hồi mỏ (Lottermoser, 2011). Các dòng phế thải khác như bùn thải của mỏ có thể được xử lý lại để thu hồi kim loại và hợp chất, hoặc có thể được tái sử dụng làm chất kết tụ, phụ để loại bỏ phosphat từ nước thải công - nông nghiệp, đồng thời sử dụng làm các chất phụ gia cho đất nông nghiệp. Mặt khác, đuôi thải

của nhà máy tuyển có thể được xử lý lại để thu hồi kim loại và hợp chất khác. Quặng đuôi giàu cát có thể được trộn với xi măng làm chất lấp đầy trong các mỏ hầm lò. Phế thải giàu đất sét có thể được sử dụng để sản xuất gạch, xi măng, gạch lát nền, thiết bị vệ sinh và đồ gốm. Tuy nhiên, các cơ hội tái sử dụng được đề xuất lại có những khó khăn riêng. Ví dụ, thành phần không đồng nhất và khoáng chất phức tạp của những vật liệu này có thể ảnh hưởng đến các đặc tính vật lý và hóa học của các sản phẩm và quy trình dự kiến. Hơn nữa, phế thải khai thác và nhà máy tuyển có thể chứa nhiều nguyên tố kim loại chuyển tiếp, nguyên tố độc hại và chất phản ứng có thể gây ô nhiễm môi trường. Đồng thời các loại phế thải này có giá trị thấp và nằm xa khu vực chế biến nên khó triển khai thực tế cũng như khó tiếp cận các thị trường tiềm năng (Lottermoser, 2011).

3.2. Thu hồi kim loại và tái chế bụi luyện kim

Bụi luyện kim bao gồm các hỗn hợp không đồng nhất của các oxit phức tạp có nguồn gốc từ cấp liệu bị cuốn vào khí thải từ các lò luyện và và tinh chế. Phần lớn bụi được tạo ra từ các quá trình như: luyện gang bằng lò cao; chuẩn bị nguyên và nhiên liệu (ví dụ, nhà máy than cốc, thiêu kết và vôi viên); lò điện hồ quang (EAF); lò chuyển oxy kiềm (BOF); luyện thép không gỉ; nấu chảy và chuyển hóa kim loại cơ bản và trong các lò hồ quang chìm (SAF) để sản xuất ferrochrome và ferromangan. Các đặc tính hóa lý của bụi rất khác nhau tùy thuộc vào quy trình thiết kế, thông số công nghệ, quy trình vận hành và loại nguyên liệu thô được sử dụng. Ví dụ, để sản xuất ra 1 tấn thép kim loại nóng (tHM) sẽ tạo ra khoảng 7 - 45 kg bụi lò cao chứa từ 100 - 150 g Zn. Bụi luyện kim được phân loại là phế thải nguy hại, vì chúng chứa các nguyên tố kim loại độc hại như: Pb, Cr, Zn và Cd. Do đó, chúng không thể được xử lý trong các bãi chôn lấp nếu chưa qua tiền xử lý (Ndlovu, Simate và Matinde, 2017).

Hơn nữa, bụi luyện kim rất mịn và khó xử lý. Mặc dù, những vật liệu này chứa nhiều kim loại có giá trị, nhưng việc tuần hoàn trong sơ đồ công nghệ thường bị hạn chế bởi khả năng tích tụ các hợp chất kim loại dễ bay hơi và có hại cho quá trình sản xuất (Ndlovu, Simate và Matinde, 2017). Bảng 2 trình bày một số tính chất đặc trưng và các phương án tái chế áp dụng cho các loại bụi luyện kim (Ndlovu, Simate và Matinde, 2017).

Bụi trong quá trình sản xuất gang và thép là hỗn hợp không đồng nhất của các oxit phức tạp có nguồn gốc từ cấp liệu. Do đó, bụi chứa một lượng đáng kể sắt, chất khử và các hợp kim. Công nghệ xử lý bụi đòi hỏi phải thu hồi được các nguyên tố kim loại có giá trị chứa trong bụi, nhưng vẫn đảm bảo sản phẩm thải an toàn với môi trường và hầu như không chứa các kim loại có ích. Hiện nay, thường dùng công nghệ hòa luyện và thủy luyện để thu hồi các kim loại có giá trị từ bụi luyện kim.

Bảng 2. Đặc tính của bụi luyện kim và các quy trình tái chế

Loại chất thải	Đặc tính	Tái chế và giảm thiểu	Thách thức khi tái chế
Bụi lò cao	7-45 kg bụi/tấn gang lỏng (tHM); 100 -150 g Zn/tHM	Đóng bánh và tái chế trong chính quá trình sản xuất, làm nguồn bổ sung sắt và cacbon	Khả năng tái chế bị hạn chế bởi sự tích tụ của các hợp chất kim loại dễ bay hơi, hợp chất hữu cơ kim loại,

Bụi luyện cốc	Chứa khoảng > 1 kg than cốc / tấn cốc	Phụ gia trong nhà máy thiêu kết làm nhiên liệu phụ và chất khử	polychlorinated dibenzo-p-dioxin và dibenzofurans (PCDD / Fs) sinh ra trong quy trình công nghệ. Cần phải có hệ thống làm sạch sạch khí thải phức tạp nhưng khí thải vẫn có vấn đề.
Thiêu kết quặng sắt	Thay đổi	Đóng bánh và tái chế trong chính quá trình sản xuất cũng làm các chất phụ gia, phụ trợ trong lò cao và lò điện hồ quang (EAFs).	
Bụi chuyển lò	14 – 143 kg bụi/tấn thép lỏng; 0,75 – 24 kg Zn/tấn thép lỏng		Vật liệu cần được kiểm soát vì khả năng phát tán dài hạn của các nguyên tố kim loại độc hại trong bụi hóa rắn hoặc ổn định phần lớn chưa được biết đến.
Bụi lò điện hồ quang	15 – 20 kg bụi/tấn thép. Hàng năm phát sinh trên 8,5 Mt	Đóng bánh và tái chế trong quá trình sản xuất. Thu hồi kim loại bằng cách sử dụng các quy trình hòa luyện, thủy luyện và plasma. Hóa rắn hoặc / và ổn định bụi.	Khả năng tái chế bị hạn chế bởi sự tích tụ của các hợp chất kim loại dễ bay hơi trong quy trình công nghệ, hàm lượng kim loại có giá trị thay đổi, các đặc tính khoáng vật học và hóa học phức tạp của bụi. Chi phí cho dây chuyền thu hồi kim loại từ bụi tồn kém.
Bụi khi làm thép không gỉ	10 – 70kg bụi/tấn thép		
Bụi khi luyện ferro Crom (HcFeCr)	18 – 25 kg bụi/tấn HcFeCr	Hệ thống tái chế bụi tích hợp trong quy trình sản xuất. Giảm phát thải bụi bằng cách bắt buộc sử dụng các lò nung kín, kết tụ cấp liệu, sử dụng hệ thống làm sạch khí ướt phức tạp, kiểm soát chất lượng nguyên liệu thô và các thông số trong quy trình sản xuất.	Khả năng tái chế bị giới hạn bởi sự tích tụ của các hợp chất kim loại dễ bay hơi trong quy trình công nghệ và hàm lượng các kim loại có giá trị thay đổi. Khí thải chưa đáp ứng yêu cầu thải. Hệ thống làm sạch khí ướt phức tạp, tồn kém và có thể không phải lúc nào cũng có sẵn.
Bụi khi luyện ferro mangan (HcFeMn)	Chứa đến 25% Mn và các kim loại bay hơi khác.		
Bụi khi luyện các kim loại cơ bản (Cu)	Chứa đến 30% Cu và một lượng lớn Fe, S, Zn, và các kim loại (As, Sb, Pb, Cd, Bi)	Bụi này đã được tái chế. Thu hồi kim loại bằng phương pháp hòa luyện, thủy luyện hoặc kết hợp cả hai.	Khả năng tái chế bụi của nhà máy luyện bị hạn chế bởi sự tích tụ của các kim loại độc hại dễ bay hơi như: As, Sb, Pb, Cd và Bi, hàm lượng kim loại có giá trị thấp và các đặc tính khoáng vật học và hóa học phức tạp của bụi.

3.2.1. Thu hồi kim loại và tái chế bụi luyện kim đen bằng công nghệ hòa luyện

Như đã chỉ ra trong Bảng 2, việc tái chế trực tiếp bụi luyện kim đen bị hạn chế bởi sự hiện diện của các hợp chất kim loại độc hại dễ bay hơi như Zn, Cd, As và Pb. Ví dụ, trong sản xuất thép, các hợp chất chứa Zn như zincit (ZnO) và đặc biệt là Franklinit ($ZnFe_2O_4$) luôn tồn tại, vì thường sử dụng thép mạ kẽm phế liệu làm nguyên liệu cho các quá trình sản xuất. Công nghệ hòa luyện để xử lý bụi luyện kim đen xoay quanh quá trình khử bằng cacbon: $ZnFe_2O_4 \rightarrow ZnO + Fe_2O_3 \rightarrow Zn(k) + Fe \rightarrow ZnFe_2O_4$ trong bụi. Kết quả là kẽm bay hơi, sau đó được thu hồi bằng các thiết bị ngưng tụ ở khâu sau (Ndlovu, Simate và Matinde, 2017).

Ngày nay, phương pháp hòa luyện được áp dụng rộng rãi để tái chế bụi luyện kim đen, vì phương pháp này có tính khả thi về mặt kỹ thuật và kinh tế. Một số quy trình công nghệ hòa luyện thu hồi kim loại và tái chế các loại bụi luyện kim cho ở Bảng 3 (Ndlovu, Simate và Matinde, 2017).

Bảng 3. Một số quy trình công nghệ thu hồi kim loại và tái chế bụi luyện kim

Công nghệ	Tóm tắt quy trình công nghệ	Sản phẩm
Lò quay (bụi chứa Zn), ví dụ FASTMET®, INMETCO®	Khử cacbon ở trạng thái rắn và khử kẽm hóa trong bụi sản xuất thép ở dạng viên bằng cách sử dụng lò quay (RHF) trong khoảng nhiệt độ 1200–1400°C. Bụi sau nung được xử lý để thu hồi kẽm.	Khí thô giàu ZnO và khử sắt trực tiếp từ kim loại hóa.
Premus®	Bụi của sản xuất thép được khử ở trạng thái rắn trong lò đa nhiệt (nhiệt trong khoảng 1000–1100°C) bằng than cốc hoặc than mịn và tiếp đến là sự nấu chảy sắt nóng đông bánh (HBI) trong lò EAF.	Khí thô giàu ZnO (Zn > 55%), nạp trực tiếp HBI vào EAF.
Lò đứng	Lò đứng sử dụng than cốc ở dạng tầng sôi để nấu chảy và khử bụi luyện thép trong khoảng nhiệt độ 1500–1600°C.	Khí thô giàu ZnO, kim loại nóng / thép thô và xỉ nghèo thân thiện với môi trường.
Oxyfines™	Quá trình oxy-nhiên liệu để nấu chảy bụi mịn trong khoảng nhiệt độ 1600–1700°C.	
Enviroplas™	DC - lò plasma hồ quang để nấu chảy-khử bụi mịn của luyện thép và luyện sắt trong khoảng nhiệt độ 1600–1700°C.	
OxyCup®	Lò đứng để khử và nấu chảy bụi luyện kim đen ở dạng kết tụ trong khoảng nhiệt độ 1500–1600°C.	
Waelz	Lò Waelz khử các oxit kim loại ở dạng viên bằng cacbon ở nhiệt độ 1100–1200°C. Khi đó, các hợp chất của Zn và Pb sẽ bay hơi đi vào bụi lò. Bụi lò giàu ZnO và PbO tiếp tục được xử lý.	

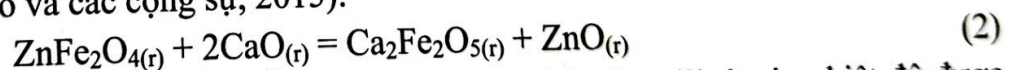
3.2.2. Thu hồi kim loại và tái chế bụi luyện kim bằng công nghệ thủy luyện

Ưu điểm chính của công nghệ hòa luyện là quy trình đơn giản, thu hồi nhanh, công suất lớn, ... khi xử lý bụi luyện kim chứa một lượng lớn kẽm nằm ở dạng $ZnFe_2O_4$. Tuy nhiên, công nghệ này rất nhạy cảm về chi phí sản xuất vì yêu cầu nhiệt năng cao, hệ thống thu gom bụi phức tạp và yêu cầu hệ thống thu hồi kim loại dễ bay hơi từ khí thải. (Ndlovu, Simate và Matinde, 2017). Do đó, ngày nay công nghệ thủy luyện đang dần thay thế hòa luyện trong quy trình xử lý bụi luyện kim. Công nghệ thủy luyện có những ưu điểm cơ bản như: đây chuyển công nghệ linh hoạt, phù hợp với nhiều quy mô sản xuất, chi phí đầu tư thấp và ít hoặc không có những rủi ro về môi trường liên quan đến khí thải, bụi và tiếng ồn. Tuy nhiên, tính khả thi về kinh tế - kỹ thuật của công nghệ thủy luyện đòi hỏi phải quản lý cẩn thận nước thải và các giải pháp xử lý nước thải (Ndlovu, Simate và Matinde, 2017). Ngoài ra, việc áp dụng công nghệ thủy luyện rộng rãi trong xử lý bụi luyện kim cũng gặp nhiều trở ngại. Vì đặc tính vật lý, hóa học và thành phần phức tạp của bụi. Ví dụ, hầu hết kẽm của bụi lò EAF đều tồn tại ở dạng Franklinit ($ZnFe_2O_4$) ổn định và không hòa tan trong hầu hết các môi trường có tính axit, kiềm và chelat ở các điều kiện thông thường (Ndlovu, Simate và Matinde, 2017). Hơn nữa, các quy trình công nghệ thủy luyện sử dụng dung môi hòa tách axit, kiềm hoặc chelat có độ hòa tan chọn lọc kém, nên thường cùng hòa tan nhiều kim loại khác. Do đó, làm tăng độ phức tạp của các quy trình làm sạch dung dịch. Hiện nay, một số quá trình hòa tách và tiền xử lý khác được đề xuất hoặc đang được nghiên cứu để cải thiện động học và tính kinh tế của các quá trình hòa tách (Binnemans và Jones, 2017).

3.2.3. Xu hướng mới trong tái chế, tái sử dụng bụi và chất thải khác của nhà máy luyện kim

3.2.3.1. Tiền xử lý và hòa tách bụi sắt

Do sự hiện diện của $ZnFe_2O_4$ trong bụi đưa ra những thách thức đối với quá trình hòa tách thông thường trong môi trường nước. Do đó, một số nghiên cứu đã tập trung vào quá trình tiền xử lý nhiệt đối với bụi mang Zn trước khi hòa tách. Chairaksa-Fujimoto và cộng sự đã nghiên cứu ảnh hưởng của việc bổ sung CaO đến sự chuyển hóa của $ZnFe_2O_4$ trong bụi lò EAF công nghiệp. Các tác giả khẳng định rằng $ZnFe_2O_4$ có thể bị phân hủy bằng cách xử lý nhiệt trong phạm vi nhiệt độ 900 – 1100 °C khi có mặt của CaO. Phản ứng theo phương phân cực tạo ra ZnO và $Ca_2Fe_2O_5$, như được trình bày trong Phương trình (2) (Chairaksa-Fujimoto và các cộng sự, 2015):



Dựa trên tính khả thi về mặt nhiệt động học của phản ứng (2) ở các nhiệt độ được khảo sát, các tác giả đã chứng minh rằng 100% ZnO có thể được hòa tách chọn lọc trong môi trường axit hoặc kiềm thông thường sau 4 giờ. Vì khả năng hòa tan của sắt và canxi không đáng kể trong các điều kiện thí nghiệm, nên dư lượng $Ca_2Fe_2O_5$ có thể được sử dụng làm chất trợ dung khử photpho trong quá trình luyện thép.

3.2.3.2. Hòa tách bụi bằng dung môi không chứa nước

Để tăng khả năng hòa tách và tính chọn riêng, việc sử dụng các dung môi hữu cơ phân tử như: chất lỏng ion, dung môi hỗn hợp eutectic (DES), dung môi hữu cơ và carbon dioxide siêu tới hạn đã được nhiều nhà nghiên cứu dùng để hòa tách kim loại. Một quan

tâm đặc biệt trong những năm gần đây là việc sử dụng chất lỏng ion (dạng ion protic) và các axit cacboxyl thể lỏng chứa ion để hòa tách kim loại từ nhiều loại quặng và tài nguyên thứ cấp. Chất lỏng ion là muối nóng chảy ở nhiệt độ thấp bao gồm các cation và anion hữu cơ hoặc vô cơ. Chúng ngày càng được các nhà nghiên cứu quan tâm do chúng không bay hơi, độc tính thấp, độ dẫn ion tốt và vùng thế điện hóa rộng (Park và cộng sự, 2014). Kilicarslan và cộng sự đã nghiên cứu việc sử dụng chất lỏng ion 1-butyl- 3-metyl-imidazolium hydro sulphat ($\text{bmim}^+(\text{HSO}_4^-)$) với sự có mặt của hydrogen peroxide (H_2O_2) và kali peroxymonosulfate (oxone) làm chất oxy hóa để hòa tách chất thải đồng thau có chứa 3,4% Al; 5,81% Ca; 22% Cu; 12,17% Si và 53,92% Zn. Kết quả nghiên cứu cho thấy rằng 50% thể tích $[\text{bmim}^+]\text{HSO}_4^-$ phân ly trong dung môi, đây là một chất lỏng ion hiệu quả để hòa tách tro đồng, ngay cả khi không sử dụng bất kỳ chất oxy hóa nào thì hiệu suất hòa tách vẫn lên đến 99% đối với Zn và 24,82% đối với Cu. Các nghiên cứu khác cũng chỉ ra rằng kẽm nguyên chất trong chất thải đồng thau có thể được thu hồi bằng cách hòa tách trong chất lỏng ion axit Bronsted và sau đó điện phân thu hồi (Kilicarslan và Saridede, 2015).

Do tính chất dung môi tương tự với chất lỏng ion nên việc sử dụng dung môi hỗn hợp eutectic cũng đã được chú ý đáng kể trong việc hòa tan các oxit kim loại từ các nguồn thứ cấp. Abbott và cộng sự đã nghiên cứu khả năng hòa tan các oxit kim loại khác nhau bằng cách sử dụng dung môi eutectic gốc choline clorua ($\text{HOC}_2\text{H}_4\text{N}(\text{CH}_3)_3^+\text{Cl}^-$) ở nhiệt độ thấp. Họ đã phát hiện ra rằng các oxit như ZnO , PbO_2 và Cu_2O sẽ tan đáng kể trong dung môi urê / choline clorua eutectic có tỷ lệ 2:1 ở 60°C . Trong khi đó, ở điều kiện này các oxit nhôm và sắt có độ hòa tan rất thấp (xem Bảng 4). Tính chọn riêng của các dung môi eutectic được sử dụng cho thấy khả năng hòa tách và phân chia một cách chọn riêng các kim loại từ bụi luyện kim bằng phương pháp điện hóa (Abbott và cộng sự, 2006, 2011). Mặc dù việc áp dụng thương mại các quy trình luyện kim bằng dung môi không chứa nước vẫn còn ở giai đoạn sơ khai. Nhưng các kỹ thuật này mang lại một số ưu điểm như tính chọn riêng cao, khả năng thu hồi các kim loại có giá trị ở trạng thái tinh khiết, khả năng khử độc và tạo ra các bã thải thân thiện với môi trường. Bảng 5 trình bày một số nghiên cứu đã hoặc đang được tiến hành bằng cách sử dụng phương pháp thủy nhiệt và hòa tách để xử lý bụi và cặn luyện kim trong dung môi không chứa nước.

Bảng 4. Độ hòa tan của các oxit kim loại trong eutectic urê / choline clorua 2: 1 ở 60°C

Oxit kim loại	Nhiệt độ nóng chảy, $^\circ\text{C}$	Độ hòa tan, ppm
Al_2O_3	2045	<1
CaO	2580	6
CuO	1326	470
Cu_2O	1235	8725
Fe_2O_3	1565	49
Fe_3O_4	1538	40
MnO_2	535	493
NiO	1990	325
PbO_2	888	9157
ZnO	1975	8466

3.2.3.3. Tổng hợp vật liệu cấu trúc và chức năng từ bụi

Cho đến nay, việc thu hồi kim loại từ bụi luyện kim bằng cách sử dụng các phương pháp thủy luyện và hòa luyện đã được thực hiện với mức độ thành công khác nhau. Song song với đó cũng có nhiều nghiên cứu đang được tiến hành để tăng tiềm năng giá trị của bụi bằng cách kết hợp các vật liệu này trong quá trình tổng hợp thành các vật liệu cấu trúc và chức năng như: thủy tinh, gốm sứ và sắt từ mềm. Hầu hết các nghiên cứu này đã chứng minh khả năng tổng hợp thành vật liệu ferrit tính từ mềm (MFe_2O_4 , với M là Ni, Cr, Zn, Mn, v.v.), từ phản ứng ở trạng thái rắn, thiêu kết, ép nóng hoặc hóa rắn bụi luyện kim có chứa các vật liệu này. Năm 2017, Wang và các cộng sự đã đề xuất một quy trình để tổng hợp các vật liệu ferrit Ni-Zn có cường độ từ hóa bão hòa cao (M_s khoảng $60,5 \text{ emu g}^{-1}$) và lực khử từ thấp (H_c khoảng $49,8 \text{ Oe}$), từ phản ứng ở trạng thái rắn của bụi lò EAF bằng $NiCl_2 \cdot 6H_2O$ ở 1100°C trong 2 giờ (Wang và cộng sự, 2017a). Trong các nghiên cứu khác, Salamati, Younesi và Bahramifar đã đề xuất một phương pháp tổng hợp vật liệu nano có vỏ lõi từ Fe_3O_4 - TiO_2 từ bụi lò EAF với mức độ siêu thuận từ và hoạt tính quang xúc tác cao sử dụng để phân hủy oxy hóa học (COD) trong nước thải nhà máy thép. Các quy trình công nghệ được đề xuất đã chứng minh tiềm năng chuyển đổi các dòng chất thải như bụi lò EAF từ chất thải rắn ô nhiễm thành các sản phẩm có giá trị cao (Salamati và cộng sự, 2017). Bảng 6 trình bày một số cách tiếp cận sáng tạo hiện đang được sử dụng để tổng hợp vật liệu cấu trúc và chức năng từ bụi luyện kim.

Bảng 5. Một số công nghệ mới trong tiền xử lý và sử dụng dung môi không chứa nước

Cách tiếp cận	Những phát hiện chính	Tham khảo
Hòa tách bụi lò cao bằng cách sử dụng axit cacboxylic và các dung môi không chứa nước	Sử dụng dung môi không chứa nước để chiết xuất chọn riêng Zn lên đến 85,7% bằng cách sử dụng axit prop-2-eonic. Mức độ hòa tan sắt tối thiểu (khoảng 8,5% Fe). Khử độc bã và nước thải bằng chất nền oxit sắt.	Steer và Griffiths, 2013
Hòa tách chọn lọc các nguyên tố đất hiếm (REE) từ cặn bauxit bằng cách sử dụng các chất lỏng kỵ nước chứa nhóm chức phân ly.	Hòa tách có chọn lọc các oxit kim loại bằng các chất lỏng ion theo nhiệm vụ cụ thể của các nhóm chức cacboxyl. Mức độ hòa tan 70-85% REE từ cặn bôxít bằng cách sử dụng chất lỏng ion betainium bis(trifluoromethylsulfonyl) imide ($HbetTf_2N$) (ở 150°C , thời gian hòa tách 4 giờ và nồng độ bùn 10%), tiếp theo chiết ly trong dung dịch axit ở nhiệt độ phòng. Hòa tan ($T > 55^\circ\text{C}$): $6HbetTf_2N + REE_2O_3 \rightarrow 2REE(bet)_3(Tf_2N)_3 + 3H_2O$ (3) $REE(bet)_3(Tf_2N)_3 + 3HCl_{(l)} \rightarrow REECl_{3(l)} + 3HbetTf_2N$ (4) Khả năng hòa tan của kim loại được tăng cường nhờ kiểm soát nhiệt độ và pH. Các kim loại Ca, Na và Al	Davris và các cộng sự, 2016;

Cách tiếp cận	Những phát hiện chính	Tham khảo
Xử lý bùn của máy lọc khí lò luyện chì bằng phương pháp thủy luyện từng bước trong dung dịch NaCl và NaClO ₃ để thu hồi Pb, Se và Hg	<p>cũng bị hòa tan, còn Fe, Si và Ti hòa tan rất thấp, do đó nâng cao tính chọn riêng của quá trình hòa tách.</p> <p>Dùng NaCl để hòa tách và chiết Pb. Sử dụng CaO để kết tủa và làm giàu Se và Hg, sau đó từng bước hòa tách Se và Hg trong HCl và natri clorat, sau đó kết tủa để thu hồi các nguyên tố riêng lẻ có độ tinh khiết cao (Pb, Hg và Se).</p>	Xing và cộng sự, 2017
Trích ly thủy nhiệt để thu hồi Zn từ ZnFe ₂ O ₄ trong bụi lò EAF bằng cách sử dụng hỗn hợp sắt clorua hexahydrat.	<p>Sử dụng hỗn hợp sắt clorua hexahydrat để hòa tan có chọn lọc Zn và Pb từ bụi lò EAF, sau đó hòa tách ZnCl₂ trong môi trường nước:</p> $2(\text{FeCl}_3) \cdot 6\text{H}_2\text{O}_{(r)} + 3\text{ZnFe}_2\text{O}_4 \rightarrow 4\text{Fe}_2\text{O}_{3(r)} + 3\text{ZnCl}_{2(r)} + 12\text{H}_2\text{O} \quad (5)$ <p>Sau quá trình khử độc, bã thải oxit sắt có thể được sử dụng làm chất trợ dung và / hoặc nguyên liệu thô trong sản xuất thép.</p>	Wang cộng sự, 2016a;
Bụi lò EAF chứa ZnFe ₂ O ₄ được tiền xử lý bằng CaO, sau đó hòa tách bằng NH ₄ Cl để trích ly Zn	<p>Hiệu suất trích ly Zn trên 80% từ ZnFe₂O₄ được xử lý bằng CaO (Phương trình (2)) sau đó hòa tan ZnO được tạo thành từ sự phân trong ly nhiệt của ZnFe₂O₄ bằng NH₄Cl 2M, (70°C, tỷ lệ R/L 1:300, 2 giờ) theo phản ứng:</p> $\text{ZnO}_{(r)} + 2\text{NH}_4\text{Cl}_{(l)} \rightarrow \text{Zn}(\text{NH}_3)_2\text{Cl}_{2(l)} + \text{H}_2\text{O}_{(l)} \quad (6)$ <p>Khả năng hòa tách hạn chế của Ca và tính tan không đáng kể của Fe để tạo ra bã thải Ca₂Fe₂O₅ tro có thể sử dụng làm chất trợ dung trong luyện gang và thép.</p>	Miki và các cộng sự, 2016
Thu hồi kim loại từ bụi lò EAF bằng cách sử dụng chất lỏng ion (eutectic sâu)	<p>Ứng dụng của chất lỏng ion choline clorua và urê trong quá trình hòa tách chọn lọc Zn và Pb từ hỗn hợp các chất nền oxit kim loại và cho ra bã thải các oxit sắt và aluminosilicat không hòa tan có thể tái chế.</p>	Binnemans và Jones, 2017
Hòa tách chọn lọc và thu hồi Bi ₂ O ₃ từ bụi lò chuyển của nhà máy luyện đồng.	<p>Hiệu suất hòa tách trên 90% Bi dưới dạng Bi₂O₃ từ bụi đồng đã được xử lý sơ bộ bằng cách sử dụng H₂SO₄ và NaCl, tiếp theo là quá trình thủy phân BiCl₃ từ dung dịch để tạo thành Bi₂O₃ rắn tinh khiết:</p> $\text{Bi}_2\text{O}_{3(r)} + 3\text{H}_2\text{SO}_{4(dd)} \rightarrow \text{Bi}_2(\text{SO}_4)_{3(r)} + 3\text{H}_2\text{O}$	Ha và các cộng sự, 2015

Cách tiếp cận	Những phát hiện chính	Tham khảo
(7)	$\text{Bi}_2(\text{SO}_4)_{3(r)} + 6\text{HCl} \rightarrow \text{BiCl}_{3(dd)} + 2\text{Na}_2\text{SO}_{4(r)}$	
(8)	$\text{BiCl}_{3(dd)} + 3\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{BiOCl}_{(r)} + 2\text{HCl}_{(l)}$	
(9)	$\text{BiOCl}_{(r)} + 2\text{NaOH}_{(l)} \rightarrow \text{Bi}_2\text{O}_{3(r)} + 2\text{NaCl} + \text{H}_2\text{O}$	
(10)		

Bảng 6. Một số cách tiếp cận mới nhằm tăng giá trị của bụi luyện kim màu

Cách tiếp cận	Ghi chú	Tham khảo
Hành vi nhiệt và hóa của các loại thủy tinh khác nhau trong tro bay luyện thép và chuyển đổi chúng thành gốm thủy tinh	Tổng hợp thủy tinh tro về mặt hóa học và thủy tinh màu từ hỗn hợp 10% tro bay luyện thép, hệ thống gồm thủy tinh $\text{CaO-MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ và các loại vật liệu vô cơ khác.	Barbieri, Corradi và Lancellotti 2002
Ổn định các cấu tử niken từ bụi aluminat và ferrit và khảo sát hành vi hòa tách của chúng	Thiêu kết (600-1480°C; 3 giờ) bùn thải chứa niken, niken liên kết trong niken aluminat (NiAl_2O_4) và niken ferrit (NiFe_2O_4) chúng ổn định và độc tính hòa tách thấp (TCLPs).	Shih, White, và Leckie, 2006
Tổng hợp vật liệu ferrit mangan từ tính từ quặng mangan hàm lượng thấp	Tổng hợp ferrit mangan có từ tính (gần $27,24 \text{ emug}^{-1}$) từ quặng Mn hàm lượng thấp bằng quá trình hòa tách axit oxy hóa, đông kết tủa và nung (1000–1200°C).	Rashad, 2006
Gốm kết cấu làm bằng đất sét và bụi lò luyện thép	Tổng hợp vật liệu gạch và gạch rỗng đạt tiêu chuẩn TCLPs từ hỗn hợp đất sét nung kết chứa tới 20% trọng lượng bụi lò EAF ở 1100°C.	Machado và các cộng sự, 2011
Gốm cấu trúc chứa bụi lò EAF	Nghiên cứu quy mô thí điểm về các đặc tính ổn định của cấu trúc gốm đất sét / bụi lò EAF và tổng hợp các khối gốm cấu trúc có chứa đến 5% trọng lượng bụi EAF với các tính chất hóa học, vĩ mô và cơ học tốt và TCLPs thấp.	Stathopoulos và cộng sự, 2013
Tái chế bụi lò EAF thành bùn đỏ	Tổng hợp gốm nung từ hỗn hợp bụi lò EAF và đất sét tự nhiên với các chỉ tiêu khoáng vật học và cơ lý phù hợp cho các ứng dụng xây dựng dân dụng.	Vieira và cộng sự, 2013
Tổng hợp hạt nano $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-TiO}_2$ lõi từ tính	Tổng hợp vật liệu nano $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-TiO}_2$ lõi-vỏ từ bụi lò EAF với mức độ siêu từ tính và hoạt	Salmati và cộng sự, 2017

từ bụi lò EAF	tính quang xúc tác để phân hủy oxy hóa học (COD) trong nước thải nhà máy thép.	
Thủy tinh chức năng và thủy tinh gốm sứ từ chất thải giàu sắt và bã thải công nghiệp	Rà soát các quy trình và công nghệ để tổng hợp các sản phẩm thủy tinh chức năng với hoạt tính xúc tác, từ tính, quang học và điện phù hợp từ cặn chứa sắt-oxit.	Chinnam và cộng sự, 2017
Tổng hợp vật liệu ferrit Ni-Zn từ bụi lò EAF chứa Zn đã qua xử lý	Quy trình một bước để tổng hợp các ferrit Ni-Zn với cường độ từ hóa bão hòa cao (M_s khoảng 60,5 emug ⁻¹) và lực khử từ thấp (H_c khoảng 49,8 Oe) từ phản ứng ở trạng thái rắn của bụi EAF với NiCl ₂ .6H ₂ O tại 1100°C trong 2 giờ.	Wang và cộng sự, 2017a

3.3. Thu hồi kim loại, tái chế và tái sử dụng xỉ luyện kim

Xi luyện kim đóng vai trò không thể thiếu trong quá trình chế tạo kim loại và được tạo ra với khối lượng lớn trong các quy trình hòa luyện và tinh luyện. Trên thực tế, các quá trình hòa luyện tạo ra một lượng sản phẩm phụ là xỉ rắn. Trong quá trình nấu chảy và tinh luyện, xỉ tách ra khỏi kim loại hoặc hợp kim rồi được tháo ra khỏi lò trước khi được tạo hạt và làm nguội chậm. Tùy thuộc vào quy trình thiết kế và điều kiện công nghệ, xỉ luyện kim chứa một lượng đáng kể các kim loại bị cuốn hoặc hòa tan vào có thể gây nguy hại lâu dài đến môi trường. Ví dụ như crôm trong thép không gỉ và xỉ hợp kim ferrocrom có thể gây ra các vấn đề môi trường nghiêm trọng, do chúng dễ bị hòa tan, tính linh động và độc tính của crôm hóa trị 6 cao (Ndlovu, Simate, và Matinde, 2017). Do đó, thực tiễn xử lý chất thải trong các bãi chôn lấp gây ra những vấn đề lớn về môi trường. Vì vậy, cần có những nghiên cứu mở rộng để tăng khả năng tái chế và tái sử dụng của những vật liệu này (Ndlovu, Simate và Matinde, 2017).

Bảng 7. Đặc tính và khả năng tái chế, tái sử dụng của các loại xỉ luyện kim

Loại	Thành phần khoáng vật điển hình	Khả năng tái chế và tái sử dụng
Xi lò cao	Hệ CaO-MgO-Al ₂ O ₃ -SiO ₂ . Thành phần khoáng vật kết tinh chủ yếu bao gồm melilit (Ca ₂ MgSi ₂ O ₇ - Ca ₂ Al ₂ SiO ₇), và merwinite (Ca ₃ MgSi ₂ O ₈)	Tạo hạt và sử dụng làm chất phụ gia trong xi măng Pooclang, geopolyme, và các chất hấp thụ khác. Làm nguội chậm và sử dụng làm cốt liệu xây dựng và kết tụ đất.
Xi lò EAF	Ca ₃ Mg(SiO ₄) ₂ ; β-Ca ₂ SiO ₄ ; (Mg, Mn)(Cr, Al, Fe) ₂ O ₄ dung dịch rắn spinel; CaAl ₂ SiO ₆ ; (Fe, Mg, Mn)O; Ca ₂ (Al, Fe) ₂ O ₅ dung dịch rắn loại wüstit.	Các cấu tử hợp kim hòa tan và / hoặc cuốn theo xỉ. Hàm lượng tạp chất cao khó cho tinh chế xỉ. Được tái chế bằng cách nấu chảy trước để làm chất trợ dung. Xây dựng quy trình công nghệ thu hồi kim loại và làm sạch xỉ. Sự hiện diện của một lượng lớn các nguyên tố hợp kim
Xi luyện thép	α-Ca ₂ SiO ₄ ; Ca ₂ Fe ₂ O ₅ ; β-Ca ₂ SiO ₄ ; FeO - MnO - MgO dung dịch rắn; Ca ₃ SiO ₅ ; MgO; dung dịch rắn wüstite.	

Xi thép gi (AOD)	FeCr ₂ O ₄ ; FeFe ₂ O ₄ ; dung dịch rắn Ni - Cr - Fe; Ca ₂ SiO ₄ ; CaF ₂ ; Ca ₁₄ Mg ₂ (SiO ₄) ₈ ; Ca ₂ SiO ₄ ; Ca ₄ Si ₂ O ₇ F ₂ ; MgO; Hợp kim Fe - Cr; Hợp kim Fe - Ni	độc hại như: Cr và Ni nên gây khó khăn khi sử dụng chúng trong lĩnh vực khác.
Xi luyện PMG và lò chuyển	Fayalitic (2FeO.SiO ₂) trộn lẫn với một số magnetit hòa tan. Crom tồn tại dưới dạng các spinel (Fe, Mg)Cr ₂ O ₄ , đặc biệt là trong các lò nấu luyện quặng tinh.	Làm sạch xỉ và thu hồi kim loại. Sự tích tụ Cr ₂ O ₃ trong quá trình xử lý dưới dạng các spinel (Fe, Mg)Cr ₂ O ₄ trong lò nấu luyện quặng tinh làm hạn chế khả năng tái chế và tái sử dụng.
Xi luyện kim loại cơ bản (Cu và Ni)	Hệ xỉ Fayalitic (2FeO.SiO ₂) và FeO-CaO-SiO ₂ với một số magnetit hòa tan.	Làm sạch xỉ và thu hồi kim loại. Xi chuyển đổi có thể tái chế dưới dạng chất trợ dung cho nấu chảy trước và cho nấu luyện.
Xi ferro	Xi HcFeCr: Hệ Al ₂ O ₃ -MgO-SiO ₂ -Cr ₂ O ₃ chứa nhiều pha khác nhau như MgO - MgO.Al ₂ O ₃ -2MgO.SiO ₂ - 2CaO.SiO ₂ , MgO.Cr ₂ O ₃ , (Mg ₂ (Cr, Al, Si) ₂ O ₆ .	Làm sạch xỉ và thu hồi kim loại. Khả năng hòa tan, tính linh động và độc tính cao của các loại Cr hóa trị 6 bị cuốn vào và / hoặc hòa tan trong xỉ làm hạn chế các cơ hội tái sử dụng.

Bảng 7, giới thiệu một số khả năng và những khó khăn trong việc tái chế, tái sử dụng xỉ luyện kim. Tuy nhiên, các nhà khoa học vẫn không ngừng nỗ lực nghiên cứu để tìm kiếm các cơ hội làm tăng giá trị kinh tế của xỉ luyện kim. Một số nhà nghiên cứu đã tập trung vào sử dụng xỉ luyện kim trong các lĩnh vực khác nhau của nền kinh tế (Ndlovu, Simate, và Matinde, 2017). Đặc biệt, có nghiên cứu sâu rộng đã được thực hiện về việc sử dụng các loại xỉ luyện kim khác nhau để làm vật liệu xây dựng, trong sản xuất gốm sứ, các vật liệu chức năng khác (Karayannis và cộng sự, 2017) và vật liệu tạo gen (Kalinkin và cộng sự, 2014). Tuy nhiên, sự hiện diện của các nguyên tố kim loại độc hại bị cuốn hoặc hòa tan vào, cũng như sự tích tụ của các nguyên tố có hại trong xỉ vẫn là một trong những hạn chế lớn trong việc tái chế và tái sử dụng các vật liệu này.

Trước đây, nghiên cứu về luyện kim chủ yếu tập trung vào việc cải thiện hiệu suất quá trình luyện bằng cách tối ưu hóa các đặc tính của xỉ, nhưng phần lớn bỏ qua hiệu quả môi trường của chúng khi xỉ được thải từ lò. Hay, trước đây không chú trọng nhiều đến sự tích hợp toàn diện giữa các đặc tính cần thiết của xỉ đối với hiệu suất của quá trình luyện và tác động của chúng tới môi trường sau hóa rắn và thải bỏ. Tuy nhiên, động lực cho sự phát triển bền vững và quản lý môi trường, đòi hỏi sự cần thiết phải tính đến các tác động môi trường của bùn và xỉ thải. Đến nay, các nghiên cứu mới trong ngành luyện kim đang chuyển hướng sang cả kỹ thuật trong quá trình và sau quá trình xử lý các đặc tính của xỉ để đạt được hiệu quả luyện kim, hiệu suất sử dụng năng lượng trong lò và tạo ra một loại xỉ thân thiện với môi trường.

3.3.1. Công nghệ ổn định cấu trúc và thay đổi đặc tính xỉ nhằm tái chế xỉ thân thiện môi trường

Sự ổn định của các kim loại độc hại hòa tan và / hoặc cuốn theo các loại xỉ khác nhau đã được quan tâm đáng kể trong những năm gần đây. Năm 2004, Kühn và Mudersbach đã nghiên cứu ảnh hưởng của việc bổ sung MgO , Al_2O_3 và FeO đối với xỉ ở nhiệt độ cao. Các tác giả đã phát hiện ra rằng việc bổ sung các hợp chất này trước khi kết tinh xỉ ở nhiệt độ cao đã làm giảm khả năng hòa tan của kim loại crom vào xỉ khi kết đặc (Kühn và Mudersbach, 2004). Năm 2012, Cabrera-Real và cộng sự đã nghiên cứu ảnh hưởng của tính bazơ (CaO / SiO_2) và MgO đến sự ổn định của các pha khoáng được hình thành trong quá trình kết tinh của xỉ hệ $CaO-SiO_2-Cr_2O_3-CaF_2-MgO$. Theo đặc điểm Hình phần khoáng của xỉ đông đặc, các tác giả nhận thấy sự chiếm ưu thế của các thành phần $MgCr_2O_4$ và sự hiện diện nhỏ của các pha $CaCr_2O_4$ và $CaCr_2O_4$ ở tỷ lệ $CaO / SiO_2 = 1$. Tăng tỷ lệ CaO / SiO_2 lên 2 dẫn đến sự chiếm ưu thế của $MgCr_2O_4$, $CaCr_2O_4$, Cr hóa trị 5 và chứa phức $Ca_5(CrO_4)_3F$. Dựa trên chỉ tiêu TCLP của crom so sánh từ các pha có khả năng hòa tan là $CaCr_2O_4$ và $Ca_5(CrO_4)_3F$, kết quả cho thấy khả năng hòa tách cao nhất của Cr ở tỉ lệ $CaO / SiO_2 = 2$. Khả năng tan thấp của pha xỉ ổn định bởi MgO về bản chất của sự chiếm ưu thế của các pha spinel $MgCr_2O_4$, có chức năng liên kết Cr trong chất là do định (Cabrera-Real và cộng sự, 2012). Ảnh hưởng của tính bazơ đến sự ổn định của các loại crom trong pha ổn định cũng đã được nghiên cứu bởi Albertsson năm 2013. Dựa trên các thông số được nghiên cứu ở nhiệt độ cao như bổ sung alumin, xử lý nhiệt và áp suất cấp oxy, Albertsson đã cho rằng việc bổ sung alumin vào xỉ nóng chảy có hiệu quả trong việc liên kết crom trong spinel $MgAl_2O_4-MgCr_2O_4$ ổn định. Làm nguội chậm xỉ đông đặc ở nhiệt độ thấp và áp suất cấp oxy thấp cũng cải thiện sự Hình thành các pha spinel và giảm lượng crom hòa tan trong nước. Ngược lại, quá trình xử lý nhiệt xỉ có tỷ lệ CaO / SiO_2 lớn hơn 1,4 trong điều kiện cấp oxy cao làm tăng sự Hình thành các pha mang Cr có thể hòa tan (Albertsson, 2013). Trước đó, năm 1994, Barbieri và các cộng sự đã khảo sát tính tan, khả năng phản ứng và sự tạo mầm của Cr_2O_3 trong hệ thủy tinh $CaO-MgO-Al_2O_3-SiO_2$. Hệ thống xỉ chứa tới 5% Cr_2O_3 được nấu chảy ở $1400^\circ C$ để nghiên cứu ảnh hưởng của hàm lượng Mg đến sự Hình thành spinel. Ở nhiệt độ nóng chảy của thủy tinh, phản ứng của Cr_2O_3 và MgO tạo thành các spinel $Mg_2Cr_2O_4$ ổn định (Barbieri và cộng sự, 1994). Trong các nghiên cứu khác, Liapis và Papayianni đã nghiên cứu quá trình biến đổi ở nhiệt độ cao của xỉ lò EAF cacbon cao bằng cách sử dụng đá trăn châu (với thành phần khoảng 76% SiO_2 ; 14 % Al_2O_3 ; 3,4 % Na_2O ; 2,7 % K_2O ; 1,2 % CaO và 1% FeO_x theo trọng lượng), xỉ lò nung (với thành phần khoảng 62 % CaO ; 14,5 % SiO_2 ; 3,6 % MgO ; 2,5 % FeO_x và 2 % Al_2O_3) và olivin (với thành phần khoảng 50 % MgO ; 36 % SiO_2 ; 8,7 % FeO_x và 1,2 % CaO). Dựa trên các thành phần hóa học và thành phần khoáng được điều chỉnh, xỉ lò EAF biến tính được cho là phù hợp để sử dụng trong sản xuất bê tông xỉ măng có trọng lượng bình thường. Tuy nhiên, việc bổ sung các chất điều chỉnh xỉ đã làm giảm hiệu suất của lò EAF (Liapis và Papayianni, 2015).

Các nghiên cứu nổi bật từ trước đến nay ủng hộ giả thuyết: các đặc tính hóa lý của xỉ ở trạng thái nóng chảy có thể điều chỉnh để thu được xỉ luyện kim có cấu trúc và thành phần ổn định thân thiện với môi trường, phù hợp cho quá trình tái sử dụng và tái chế xỉ.

Về bản chất, công nghệ can thiệp vào xỉ là một cách tiếp cận đầy hứa hẹn để kiểm soát các đặc tính đông đặc và kết tinh của xỉ nhằm cải thiện khả năng tương thích với môi trường. Kỹ thuật tạo xỉ có thể cải thiện tính thân thiện với môi trường thông qua việc liên kết các loại kim loại độc hại trong các pha spinel ổn định. Tóm lại, các mục tiêu của kỹ thuật tạo xỉ có thể đạt được bằng cách tích hợp các khía cạnh sau: quá trình xử lý sau tháo xỉ, quá trình đông đặc và kết tinh xỉ, xác định thành phần khoáng và các hợp kim bị cuốn vào trong xỉ; đánh giá hiệu quả của các phương pháp xử lý dựa trên chỉ tiêu TCLP của vật liệu xỉ dùng một lần hoặc tái sử dụng và tương quan giữa quy trình công nghệ, cấu trúc và tính chất của xỉ với khả năng tái chế và hiệu quả môi trường.

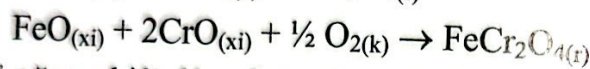
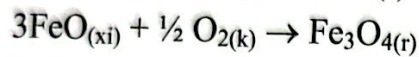
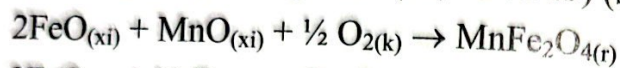
3.3.2. Công nghệ ổn định cấu trúc và đặc tính của xỉ để thu hồi kim loại

Ngoài công nghệ thu hồi kim loại từ xỉ luyện kim bằng phương pháp hóa luyện, trong những năm gần đây nhiều nghiên cứu đã sử dụng phương pháp tuyển vật lý để thu hồi kim loại. Khi kiểm soát được đặc tính đông đặc và kết tinh của xỉ, có thể điều chỉnh sự phát triển của xỉ ở các giai đoạn nhất định theo đặc tính mong muốn và cần thiết cho việc thu hồi kim loại từ các vật liệu này. Điều này có nghĩa là các kim loại hoặc hợp kim ở các pha rời rạc trong xỉ làm nguội nhanh có thể sử dụng phương pháp tuyển vật lý để phân tách chúng ra khỏi xỉ (Engström và cộng sự, 2010; Burja và cộng sự, 2017). Trên thực tế, việc thu hồi các kim loại và hợp kim hòa tan và / hoặc bị cuốn theo xỉ có thể được tăng cường bằng kỹ thuật tiền xử lý xỉ ở giai đoạn xỉ nóng, để thay đổi các đặc tính cấu trúc vi mô của vật liệu xỉ trong quá trình kết tinh và hóa rắn (Liapis và Papayianni, 2015). Cách tiếp cận này dựa trên giả thuyết rằng: các pha nhất định với các đặc tính mong muốn trong xỉ đông đặc có thể được điều chỉnh và duy trì trong quá trình đông đặc để tạo điều kiện tốt cho việc tách chúng khỏi xỉ đã đông đặc. Dựa trên các nghiên cứu về hành vi kết tinh của xỉ luyện thép trong quá trình làm nguội nhanh, Engström đã quan sát thấy sự tạo thành dung dịch rắn kiểu wüstit (Mg, Fe, Mn)O kèm theo các pha β - Ca_2SiO_4 (Engström và các cộng sự 2010). Năm 2017, Burja và cộng sự đã nghiên cứu đặc điểm của crom trong xỉ thép không gỉ $\text{CaO-SiO}_2\text{-Cr}_2\text{O}_3$ và $\text{CaO-SiO}_2\text{-MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-Cr}_2\text{O}_3$ được làm nguội nhanh. Dựa trên các phân tích nhiễu xạ tia X, các tác giả đã xác nhận sự hiện diện của các pha Cr và FeCr kim loại, cũng như sự hiện diện của cromat canxi, pseudowollastonite (CaSiO_3) và larnit (Ca_2SiO_4). Sự Hình thành các pha Cr và FeCr kim loại được đặc biệt quan sát thấy ở các loại bùn có độ kiềm thấp và chứa CrO_x mức cao (Burja và cộng sự, 2017). Trong các nghiên cứu khác, Norval và Oberholster đã nghiên cứu ảnh hưởng của quá trình tạo hạt đối với việc thu hồi mangan từ xỉ FeMn nấu chảy lại. Các tác giả đã nhận thấy sự khác biệt đáng kể về hàm lượng MnO còn lại của xỉ hạt và xỉ làm lạnh bằng không khí, trong đó hàm lượng MnO giảm xuống 6,1% trong xỉ hạt so với 21,8% trong xỉ làm mát bằng không khí (Norval và Oberholster 2011).

Sự Hình thành trong xỉ một số pha nhất định có từ tính cao có thể được tạo ra bằng cách sử dụng quá trình xử lý hóa rắn xỉ sau lò nung. Các pha như vậy có thể được duy trì trong quá trình đông đặc để tạo điều kiện tách hợp kim khỏi xỉ đông đặc bằng phương pháp tuyển từ. Dựa trên tính chất từ của các vật liệu ferrite được tổng hợp bằng nhiều phương pháp khác nhau (MFe_2O_4 , với M là Mn, Ni, Cr, Mo, v.v.) trong xỉ kết tinh có thể được tách khỏi các phần không từ (Jiang và cộng sự, 2018). Nói cách khác, việc biến đổi

các hợp chất nghịch từ của các kim loại chuyển tiếp trong xỉ thành ferrit từ tính cao bằng quá trình đông đặc và kết tinh có kiểm soát của xỉ nóng chảy là một phương pháp đầy hứa hẹn để tăng khả năng thu hồi các hợp kim có giá trị từ xỉ luyện thép; chẳng hạn như $MnFe_2O_4$ và $(Mg, Fe, Mn)O$, trong xỉ kết tinh có từ tính có thể được tách khỏi các thành phần không từ tính của xỉ luyện thép

Năm 2013, Semykina đã đề xuất một kỹ thuật sử dụng xỉ bao gồm quá trình oxy hóa các xỉ $CaO-FeO-SiO_2$ trong không khí và nóng chảy xỉ $CaO-FeO-SiO_2-MnO-Cr_2O_3$ để kết tủa các pha ferrit mà sau đó có thể được thu hồi bằng phương pháp tuyển từ. Các phản ứng oxy hóa được thể hiện trong các phương trình (11, 12 và 13) (Semykina, 2013):



Dựa trên khả năng nhiệt động học của quá trình biến đổi pha trong xỉ lỏng được nêu trong các công thức (11÷13), Shatokha và cộng sự cũng đã nghiên cứu thu hồi chọn riêng sắt và mangan từ xỉ $CaO-SiO_2-FeO$ và $CaO-SiO_2-FeO-MnO$ bị oxy hóa (Shatokha và cộng sự, 2013). Trong nghiên cứu gần đây, Jiang và các cộng sự đã nghiên cứu hoạt động oxy hóa của xỉ lò BOF ($CaO-SiO_2-MgO$ chứa 10–35% trọng lượng FeO_x) trong môi trường không khí và ở nhiệt độ (1000–1100°C). Các tác giả cũng nhận thấy khả năng Hình thành các pha spinel từ ở dạng magnetit (Fe_3O_4) và magnesio-ferrit ($MgFe_2O_4$), từ các loại chứa Fe trong xỉ. Các nghiên cứu cho đến nay, đã làm rõ các giả thuyết cơ bản rằng các kim loại chuyển tiếp ổn định được tạo ra trong xỉ lỏng, sau khi đông đặc có thể tách ra khỏi xỉ đông đặc bằng phương pháp tuyển từ (Jiang và cộng sự, 2018).

3.3.3. Tổng hợp vật liệu chức năng từ xỉ rắn

Xỉ luyện kim có tiềm năng lớn để làm nguyên liệu sản xuất các vật liệu chức năng như gốm thủy tinh nung kết, gốm xốp, gạch gốm, zeolit có chức năng xử lý nước thải, vật liệu chịu lửa và một số ứng dụng khác. Đặc biệt là sử dụng xỉ để tổng hợp gốm thủy tinh và vật liệu zeolit.

Gốm thủy tinh là vật liệu đa tinh thể hạt mịn, được Hình thành khi thủy tinh có thành phần thích hợp và được xử lý nhiệt để trải qua quá trình kết tinh có kiểm soát đến trạng thái tinh thể có năng lượng thấp hơn (Bai và các cộng sự, 2016). Cho đến nay, vật liệu chức năng gốm, sứ, thủy tinh nung kết đang là những lựa chọn thay thế cho sản xuất gốm thủy tinh thông thường với chi phí thấp. Những vật liệu này có các ứng dụng mới trong nhiều ngành công nghiệp: từ xúc tác đến cách nhiệt; hỗ trợ kết cấu nhẹ; đồ nấu ăn; gạch men và các ứng dụng quân sự (Zanotto, 2010). Việc sản xuất gốm thủy tinh nung kết với các đặc tính chức năng như hoạt tính xúc tác, tính chất quang và điện, cũng như các tính chất cơ học mong muốn từ xỉ luyện kim dựa trên hệ $CaO-Al_2O_3-SiO_2-MgO-FeO_x$ đang là mối quan tâm đáng kể trong thời gian gần đây. Năm 2016, Liu và các cộng sự đã nghiên cứu ảnh hưởng của việc bổ sung MgO / Al_2O_3 đến hành vi kết tinh, cấu trúc vi mô, tính chất cơ học và hiệu suất hóa rắn crom trong gốm thủy tinh được tổng hợp từ xỉ lò EAF. Các tác giả đã chỉ ra rằng với tỷ lệ MgO / Al_2O_3 lần lượt là 1:1 và 1:2 đã cải thiện

tính chất cơ học và ổn định crom (Liu, Zong và Hou 2016). Bai và các cộng sự đã nghiên cứu quá trình tổng hợp gốm thủy tinh sử dụng xỉ cao cacbon ferrochromium (HcFeCr) và thủy tinh chất thải. Ngoài các tính chất vi cấu trúc và cơ học có thể so sánh với các đồ gốm thủy tinh làm từ xỉ khác. Phát hiện này đã chứng minh sự phát triển của các pha ổn định $(\text{Mg}, \text{Fe})_2\text{SiO}_4$, MgAl_2O_4 , $\text{Mg}(\text{Al}, \text{Cr})_2\text{O}_4$ và Cr_2O_3 như mong muốn để giảm độc tính của các xỉ HcFeCr (Bai và cộng sự, 2016). Như đã được chứng minh qua các nghiên cứu khác nhau việc kết hợp xỉ luyện kim vào gốm thủy tinh chức năng không chỉ làm tăng khả năng tái chế với chi phí thấp và cơ hội tái sử dụng của xỉ mà còn dẫn đến việc Hình thành các pha ổn định với độc tính hòa tan thấp.

3.3.4. Tổng hợp các zeolit chức năng từ xỉ

Zeolit là chất rắn xốp dạng tinh thể với hệ thống lỗ và kênh phức tạp với khoảng cách giữa các phân tử nằm trong khoảng từ 0,3 đến 3nm (Li và cộng sự, 2016). Về cơ bản, zeolit là các aluminosilicat tinh thể liên kết ion với các nguyên tố nhóm I hoặc nhóm II (Simate và cộng sự, 2016). Cấu trúc của zeolit bao gồm một khung gồm các tứ diện $[\text{SiO}_4]^{4-}$ và $[\text{AlO}_4]^{5-}$ liên kết với nhau ở các góc bằng cách chia sẻ các nguyên tử oxy. Nhìn chung, những vật liệu này thường được sử dụng trong thương mại làm chất hấp thụ và chất xúc tác (Simate và cộng sự, 2016; Li và cộng sự, 2016). Các zeolit chức năng được sản xuất bằng phương pháp xử lý thủy nhiệt đối với xỉ giàu silicat có ứng dụng rộng rãi trong xử lý nước thải và khắc phục AMD (Lin và các cộng sự, 2016; Simate và các cộng sự, 2016). Năm 2016, Li và cộng sự đã nghiên cứu quá trình tổng hợp natri aluminat ($6\text{Na}_2\text{O} \cdot 6\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 12\text{SiO}_2$) và zeolit sodalite ($4\text{Na}_2\text{O} \cdot 3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2$) từ xỉ lò EAF mang tiền chất Ti. Hiệu quả của zeolit tinh thể tổng hợp từ các thông số khảo sát như tỷ lệ mol $\text{SiO}_2 / \text{Al}_2\text{O}_3$ (tỷ lệ 2: 1) và $\text{H}_2\text{O} / \text{Na}_2\text{O}$ (tỷ lệ 100: 1), nhiệt độ thủy nhiệt (140°C) và thời gian (3 giờ), được đánh giá thông qua việc sử dụng zeolit để loại bỏ các ion Cu^{2+} khỏi các dung dịch nước (Li và cộng sự, 2016). Trong một nghiên cứu khác, Kuwahara đã đề xuất một phương pháp hòa tách axit và kết tủa NaOH để tổng hợp các hợp chất giống như hydrotalcite ($\text{Mg}_3\text{Al}(\text{OH})_8\text{Cl} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ và $\text{Mg}_6\text{Al}(\text{OH})_{16}\text{CO}_3 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) và zeolit từ xỉ lò cao. Dựa trên khả năng hấp thụ của các ion photpho cho thấy hiệu suất của vật liệu hydrotalcit và zeolit tổng hợp lần lượt là 40 mg và 333 mg photpho trên gam. Cao hơn đáng kể so với 1,5 mg photpho trên gam đối với xỉ thô (Kuwahara và các cộng sự 2010). Do các đặc tính hấp thụ kim loại nặng và những thách thức môi trường liên quan đến nước thải chứa nhiều kim loại nặng và AMD. Nên việc tổng hợp các zeolit chức năng từ xỉ luyện kim sẽ mang lại cơ hội sử dụng các vật liệu này với chi phí thấp.

4. Kết luận

Sự phát triển nhanh và mạnh của nhiều ngành công nghiệp trong nước trong những năm qua, đã kéo theo nhu cầu về các khoáng sản thô và tinh ngày càng tăng. Đây chính là cơ hội để thúc đẩy ngành công nghiệp khai khoáng và chế biến khoáng sản của Việt Nam phát triển. Tuy nhiên, mô Hình tuyến tính về tiêu thụ tài nguyên rõ ràng dẫn đến lượng phát sinh chất thải từ ngành công nghiệp khai khoáng ngày càng lớn. Mặc dù việc phát sinh chất thải từ khai thác mỏ, tuyển và chế biến khoáng sản là không thể tránh khỏi trong quá trình sản xuất vật liệu công nghiệp. Cho đến nay, việc quản lý chất thải đã tập trung

vào quản lý cách thức tạo ra và xử lý chất thải. Nhưng cách tiếp cận quản lý chất thải truyền thống của ngành công nghiệp khai khoáng không những không bền vững mà còn làm giảm khả năng tái chế và tái sử dụng loại chất thải. Dựa trên mô Hình kinh tế tuần hoàn yêu cầu giảm thiểu, tái chế và tái sử dụng chất thải, báo cáo này đã cung cấp những đánh giá quan trọng về những nghiên cứu hiện tại và xu hướng mới trong việc tái chế và tái sử dụng chất thải ngành công nghiệp khai khoáng, cũng như những nghiên cứu làm tăng giá trị kinh tế của nguồn tài nguyên thứ cấp này.

Cho đến nay, khối lượng chất thải ngành công nghiệp khai khoáng tại Việt Nam chưa được thống kê đầy đủ. Nhưng do quặng ngày càng nghèo và nhu cầu sử dụng tăng cao nên khối lượng chất thải phát sinh hàng năm tại các mỏ, nhà máy tuyển và luyện kim là không hề nhỏ. Hầu hết, các loại chất thải này đang được xử lý bằng phương pháp chôn lấp truyền thống gây ô nhiễm môi trường và tổn thất tài nguyên. Để phát triển bền vững ngành công nghiệp khai khoáng, Việt Nam cần phải đi theo mô Hình kinh tế tuần hoàn. Tức là phát triển công nghiệp tái chế và tái sử dụng chất thải. Tuy nhiên, cần phải tích hợp với các biện pháp quản lý và giáo dục để mọi người nắm rõ tầm quan trọng của nền kinh tế tuần hoàn đến đời sống và môi trường.

Nhu cầu trong nước đối với hầu hết các khoáng sản thô và tinh dự kiến sẽ còn tăng mạnh trong những năm tiếp theo của thế kỷ này. Để đáp ứng nhu cầu trong nước, có thể thông qua con đường nhập khẩu các loại khoáng sản. Tuy nhiên, để chủ động nguồn nguyên liệu và duy trì sự cân bằng hợp lý giữa nhập khẩu và sản xuất trong nước, thì ngành công nghiệp khai khoáng và chế biến khoáng sản trong nước vẫn cần phải tiếp tục duy trì và phát triển. Trong những năm qua, nguồn cung cấp quặng chất lượng cao và dễ chế biến trong nước đã cạn kiệt và ngành công nghiệp này buộc phải khai thác và xử lý các loại quặng thấp cấp hơn và phức tạp hơn. Tình trạng này sẽ dẫn đến khối lượng chất thải rắn sinh ra trong quá trình khai thác và chế biến khoáng sản ngày càng tăng. Do đó, việc kiểm soát và xử lý các chất thải rắn theo hướng thân thiện với môi trường là một thách thức lớn cho ngành công nghiệp này. Nền tảng để phát triển bền vững ngành công nghiệp khai khoáng và chế biến khoáng sản của Việt Nam là: phát triển công nghệ tái chế và tái sử dụng chất thải rắn sinh ra trong quá trình sản xuất để đi theo mô Hình kinh tế tuần hoàn.

Tài liệu tham khảo

1. Abbott, A.P., Capper, G. và các cộng sự. 2006a. Solubility of metal oxides in deep eutectic solvents based on choline chloride. *Journal of Chemical và Engineering Data*, vol. 51. pp. 1280–1282.
2. Abbott, A.P., Capper, G., Davies, D.L., và Shikotra, P. 2006b. Processing of metal oxides using ionic liquids. *Mineral Processing và Extractive Metallurgy*, vol. 115, no. 1. pp. 15–18.
3. Abbott, A.P., Frisch, G., và các cộng sự. 2011. Processing of metals và metal oxides using ionic liquids: Critical review. *Green Chemistry*, vol. 13. pp. 471–481.